



На правах рукописи

ИВКИН Антон Евгеньевич

**ВИХРЕТОКОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ТОЛЩИНЫ НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ
ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА
НЕФЕРРОМАГНИТНЫХ
ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОСНОВАНИЯХ**

*Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2013**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Потапов Анатолий Иванович

Официальные оппоненты:

Гордиенко Валерий Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра технологии конструкционных материалов и метрологии, заведующий кафедрой

Герасимов Виктор Иванович

кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт», кафедра электротехники и электроники, доцент

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

Защита диссертации состоится 28 марта 2013 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Национальном минерально-сырьевом университете «Горный» по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1166.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Автореферат разослан 27 февраля 2013 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

В.В. ГАБОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное промышленное производство характеризуется постоянным повышением требований к качеству выпускаемой продукции. Металлические покрытия изделий из цветных металлов широко распространены во всех отраслях промышленности. Покрытия наносят с целью защиты изделий от коррозии и от воздействия окружающей среды, для придания их поверхностям специальных свойств, улучшения внешнего вида и повышения декоративных свойств. Контроль толщины покрытия является весьма важной операцией в технологическом цикле изготовления изделия, поскольку соответствие реальной толщины покрытия требованиям конструкторской и нормативно-технической документации на изделие является наиболее важным с точки зрения обеспечения функционального назначения покрытия и изделия в целом.

Для неразрушающего контроля толщины электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях в настоящее время применяются методы радиационного вида неразрушающего контроля. Сложная методика калибровки, необходимость анализа картины спектров элементов, содержащихся в покрытии и основании, высокая стоимость рентгено-флуоресцентных анализаторов затрудняет их использование в качестве толщиномеров широкой номенклатуры покрытий в цеховых условиях гальванических производств. Повышенные требования безопасности, связанные с работой с источниками радиоактивного излучения и их хранением, а также необходимость использования упорного апертурного кольца преобразователя только под определенным радиус кривизны поверхности объекта измерения снижает эффективность использования толщиномеров, основанных на методе β -отражения радиационного вида неразрушающего контроля.

Наиболее универсальными методами неразрушающего контроля толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на изделиях из неферромагнитных материалов являются методы вихретокового вида неразрушающего контроля. Вихретоковые первичные и вторичные преобразователи могут выполняться в малогабаритных, надежных конструктивных исполнениях. В отличие от методов ра-

диационного вида неразрушающего контроля, применение методов вихретокового вида экологически безопасно. Процедура калибровки вихретоковых преобразователей достаточно проста, при их эксплуатации не требуются повышенные меры техники безопасности. Перечисленные обстоятельства позволяют эффективно использовать вихретоковые толщиномеры для оперативного контроля толщины широкой номенклатуры покрытий на изделиях сложного криволинейного профиля, в цеховых условиях, в том числе непосредственно в технологическом процессе нанесения покрытия.

В настоящее время рядом ведущих производителей решены задачи контроля толщины небольшого количества типов покрытий на изделиях из цветных металлов, с заявляемой погрешностью измерения $\pm(0,01...0,03T+2...3)$ мкм. Однако, в области малых толщин покрытий, при проведении измерений в цеховых условиях при реальных технологических разбросах физических и геометрических параметров изделий, заявляемые значения погрешности не обеспечиваются.

Уменьшение погрешности измерения возможно за счет оптимизации параметров первичных измерительных вихретоковых преобразователей (ВТП), усовершенствования методик и средств измерения и обработки получаемой с ВТП первичной информации.

Цель работы: Уменьшение погрешности вихретоковых неразрушающих средств измерения толщины электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях в области толщин от 0 до 50 мкм.

Идея работы: Использование сбалансированного трехобмоточного накладного вихретокового преобразователя с ферритовым сердечником и заданной частотой тока возбуждения совместно со схемой, обеспечивающей измерение амплитуды и фазы вносимого напряжения, позволяет повысить чувствительность ВТП к толщине покрытия и уменьшить влияние характерных для промышленных производств мешающих параметров на результаты контроля, что обеспечивает уменьшение погрешности измерений.

Задачи исследования:

- провести анализ методов повышения чувствительности вихретоковых средств неразрушающего контроля;

- провести анализ методов уменьшения влияния мешающих параметров вихретокового контроля на результаты измерений;
- разработать модель взаимодействия первичного измерительного ВТП с ферритовым сердечником и заданной частотой тока возбуждения с объектом контроля (ОК);
- разработать способ выделения информативного параметра сигнала ВТП на фоне влияния мешающих параметров, позволяющий проводить измерения с погрешностью, не превышающей заданную;
- разработать методику оптимизации параметров первичного измерительного ВТП;
- разработать средства метрологического обеспечения вихретоковых толщиномеров неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях и методику их аттестации;
- изготовить и провести испытания разработанных средств вихретоковой толщинометрии;
- провести внедрение результатов работы на промышленных предприятиях.

Методы исследований.

Для исследования взаимодействия ВТП с ОК использовались методы численного моделирования, основанные на методе конечных элементов, и экспериментальные исследования сигналов макетов ВТП при проведении измерений на натуральных мерах толщины покрытий и контрольных образцах покрытий. Экспериментальные данные обрабатывались с использованием методов математической статистики. Исследования алгоритмов выделения информативного параметра сигнала ВТП проводились с применением методов математического моделирования.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости изменения плотности вихревых токов, наведенных в ОК круговым витком с током заданной частоты, от толщины покрытия, электропроводности покрытия и основания, а также от геометрических размеров ОК.
2. Разработана модель взаимодействия первичного трехобмоточного накладного измерительного ВТП с ферритовым сердечником и заданной частотой тока возбуждения с ОК, представляющим

собой неферромагнитное электропроводящее полупространство с неферромагнитным электропроводящим покрытием с заданным значением толщины и относительной электропроводностью.

3. Установлено, что отклонение от плоскостности рабочей поверхности основания меры и неравномерность нанесения покрытия являются основными источниками погрешности мер толщины покрытий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разбалансировка обмоток чувствительного элемента первичного измерительного ВТП, обеспечивающая смещение точки наблюдения по мнимой оси комплексной плоскости годографа вектора вносимого напряжения на заданную величину, при оптимальной частоте тока возбуждения и значении обобщенного параметра вихревого контроля β не более 30 при $T_n=0$, уменьшает дополнительную абсолютную погрешность измерения толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с относительной электропроводностью $\sigma_n/\sigma_0 > 2$ до $\pm 0,5 \dots 1$ мкм в диапазоне толщин от 0 до 50 мкм при девиации относительного зазора h/R_b от 0 до 0,3.

2. Смещение точки, соответствующей $T_n=0$ и $h^*=0$, вверх по годографу вектора $\dot{U}_{вн}^*(T_n)$, обеспечиваемое установкой дистанционной прокладки необходимой толщины из материала с заданной электропроводностью между контактной поверхностью измерительного амплитудно-фазового ВТП и ОК, уменьшает дополнительную абсолютную погрешность измерения толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с относительной электропроводностью $\sigma_n/\sigma_0 < 0,4$ до $\pm 1 \dots 1,5$ мкм в диапазоне толщин от 0 до 50 мкм при девиации относительного зазора h/R_b от 0 до 0,1.

3. Предлагаемая конструкция и технология изготовления оснований, приемы их отбора и подготовки совместно с технологиями получения покрытий и методикой аттестации их толщины обеспечивают возможность изготовления комплектов мер толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с абсолютной погрешностью не превышающей $\pm 0,3$ мкм, что удовлетворяет условиям гра-

дуировки и поверки вихретоковых толщиномеров неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с абсолютной погрешностью измерения не более ± 1 мкм в диапазоне толщин покрытий от 0 до 50 мкм.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается сходимостью результатов математического моделирования и аналитических расчетов с результатами экспериментальных исследований в лабораторных условиях на комплектах натуральных мер и контрольных образцах покрытий.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработана, изготовлена и сертифицирована совокупность средств неразрушающего контроля толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий изделий из неферромагнитных электропроводящих материалов.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Результаты работы были использованы научно-производственной фирмой ЗАО "Константа" при разработке электромагнитного толщиномера "К6 Гальванический" и серии вихретоковых преобразователей к нему. За период с 2011 по 2013 года реализовано и внедрено на производствах более 30 вихретоковых толщиномеров гальванических покрытий, в том числе неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях. Помимо этого результаты работы могут быть применены при контроле толщины покрытий на гальванических участках и производствах в различных отраслях промышленности.

Личный вклад автора:

- обоснована возможность применения ВТП для измерения толщины покрытий, электропроводность которых меньше электропроводности основания;

- разработан алгоритм обработки сигналов ВТП, обеспечивающий измерение толщины покрытия на фоне изменения зазора между ВТП и ОК в широком диапазоне;

- предложена конструкция, технология изготовления и методика аттестации натуральных мер толщины неферромагнитных элек-

тропроводящих покрытий на ферромагнитных электропроводящих основаниях.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на конференциях: "The 49th Annual Conference of The British Institute of Non-Destructive Testing", Cardiff, UK, 2010 г.; "XIX всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике", г. Самара, 2011 г.; "18th World Conference on Nondestructive Testing", Durban, South Africa, 2012 г.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, получен патент на метод измерения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 160 страницах. Содержит 62 рисунка, 24 таблицы и список литературы из 118 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулирована идея диссертационной работы, на основании которой поставлены цель и основные задачи исследования, а также определены научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В главе 1 проведен анализ задач измерения толщины ферромагнитных электропроводящих покрытий на ферромагнитных электропроводящих основаниях, предложена их классификация, проведен обзор и анализ существующих видов, методов и технических средств неразрушающего контроля толщины покрытий, дана характеристика объекта исследования, обоснованы цели и задачи исследований.

В главе 2 представлена общая характеристика вихретокового вида неразрушающего контроля, предложены расчетно-теоретические модели взаимодействия первичного вихретокового преобразователя с ОК, определены основные мешающие параметры, характерные для измерения толщины ферромагнитных электропроводящих покрытий на ферромагнитных электропроводящих основаниях, и их влияние на сигнал преобразователя, дана обобщенная структурная схема вихретокового толщиномера покрытий.

В главе 3 рассмотрена структура первичных измерительных вихретоковых преобразователей, обоснована оптимальная конструкция вихретокового преобразователя для измерения толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях, предложены методы и средства обработки первичной информации, позволяющие исключить влияние мешающих параметров вихретокового контроля на результаты измерений, даны рекомендации по выбору оптимальной частоты тока возбуждения преобразователя.

В главе 4 рассмотрены основные принципы стандартизации в области средств измерения толщины покрытий, установлены недостатки существующей Государственной поверочной схемы для толщиномеров покрытий, проведены исследования натуральных мер толщины металлических покрытий, предложена методика их изготовления и аттестации, представлен проект технического задания на разработку стандарта на натурные меры толщины покрытий для поверки и калибровки вихретоковых толщиномеров неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях.

В главе 5 представлены результаты экспериментальных исследований разработанных вихретоковых преобразователей на комплектах натуральных мер толщины и промышленных контрольных образцах, приведены перспективы развития и области применения результатов работы.

В заключении представлены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Положение 1.

Разбалансировка обмоток чувствительного элемента первичного измерительного ВТП, обеспечивающая смещение точки наблюдения по мнимой оси комплексной плоскости годографа вектора вносимого напряжения на заданную величину, при оптимальной частоте тока возбуждения и значении обобщенного параметра вихретокового контроля β не более 30 при $T_n=0$, уменьшает дополнительную абсолютную погрешность измерения толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с относительной электропроводностью $\sigma_n/\sigma_0 > 2$ до $\pm 0,5 \dots 1$ мкм в диапазоне толщин от 0 до 50 мкм при девиации относительного зазора h/R_v от 0 до 0,3.

При контроле толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях методами вихретокового вида неразрушающего контроля на сигналы вихретокового преобразователя оказывают влияние как контролируемые, так и мешающие параметры. Очевидно, что для задач измерения толщины покрытий изделий, контролируемым параметром является толщина покрытия. Мешающие параметры, по природе их возникновения, можно условно разделить на электрофизические и геометрические. Наибольшее влияние на сигнал ВТП оказывает девиация относительного воздушного зазора h^* между контактной поверхностью преобразователя и ОК и другие геометрические мешающие параметры, например шероховатость, изменение радиуса кривизны поверхности, которые могут быть сведены к эквивалентному относительному зазору h_3^* . Расчет взаимодействия ВТП с полем вихревых токов, наведенных в ОК, и сигналов ВТП осуществлялся методами численного моделирования. На рисунке 1 изображена модель первичного трехобмоточного накладного измерительного ВТП и картина распределения плотности вихревых токов в ОК, полученная в программе численного моделирования методами конечных элементов Maxwell. На рисунке 2.а представлен годограф зависимости комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ от контролируемого (T_n) и мешающего (h^*) параметров, при относительной электропроводности покрытия $\sigma_n/\sigma_0 > 2$.

Анализируя данный годограф, становится очевидно, что изменение толщины покрытия T_{II} оказывает большее влияние на изменение фазы $\dot{U}_{вн}^*$, в то время как изменение относительного зазора h^* в основном влияет на амплитуду $\dot{U}_{вн}^*$. Поэтому, в качестве информативного параметра вихретокового преобразователя при измерениях толщины покрытий с относительной электропроводностью $\sigma_{II}/\sigma_0 > 2$ целесообразно использовать фазу $\dot{U}_{вн}^*$. Следует отметить, что линии влияния h^* (линии отвода) годографа $\dot{U}_{вн}^*$ являются практически прямыми в диапазоне от h_1^* до h_2^* .

На рисунке 3 представлены зависимости фазы $\Delta\varphi$ относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ при изменении контролируемого (T_{II}) и мешающего (h^*) параметров из точки наблюдения, расположенной на пересечении вещественной и мнимой осей годографа. Из представленных графиков видно, что изменение h^* оказывает влияние линейного характера на сдвиг фазы $\Delta\varphi$ относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$.

Для исключения этого влияния необходимо сместить точку наблюдения за фазой вносимого напряжения по оси мнимых значений на величину $\dot{U}_{раз}^*$ (рисунок 2.б), определяемую по следующему алгоритму:

1. определяется крайняя точка h_2^* диапазона изменения относительного зазора. Точка h_1^* соответствует точке при $h^*=0$ и $T_{II}=0$.
2. точки h_1^* и h_2^* имеют координаты Re_1, Im_1 и Re_2, Im_2 соответственно.

3. величина $\dot{U}_{раз}^*$ рассчитывается по формуле:

$$\dot{U}_{раз}^* = (Re_1 Im_2 - Re_2 Im_1) / (Re_1 - Re_2). \quad (1)$$

На рисунке 4 представлены зависимости фазы $\Delta\varphi$ относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ при изменении контролируемого (T_{II}) и мешающего (h^*) параметров из точки наблюдения, смещенной на величину $\dot{U}_{раз}^*$ по мнимой оси.

В процессе проведения экспериментальных исследований вихретокового преобразователя, смещение точки наблюдения по данному алгоритму позволило уменьшить дополнительную погрешность измерения толщины серебряных покрытий на изделиях из титана в следствии изменения относительного зазора h^* в диапазоне от 0 до 0,3 до 8 раз по сравнению с аналогичным преобразователем без смещения. Максимальная абсолютная дополнительная погрешность измерения при этом не превысила $\pm 0,5$ мкм в диапазоне измеряемых толщин от 0 до 50 мкм.

Положение 2.

Смещение точки, соответствующей $T_n=0$ и $h^*=0$, вверх по годографу вектора $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T_n)$, обеспечиваемое установкой дистанционной прокладки необходимой толщины из материала с заданной электропроводностью между контактной поверхностью измерительного амплитудно-фазового ВТП и ОК, уменьшает дополнительную абсолютную погрешность измерения толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с относительной электропроводностью $\sigma_n/\sigma_0 < 0,4$ до $\pm 1 \dots 1,5$ мкм в диапазоне толщин от 0 до 50 мкм при девиации относительного зазора h/R_0 от 0 до 0,1.

Сложность измерения толщины неферромагнитных покрытий, электропроводность которых меньше электропроводности неферромагнитных оснований, с исключением влияния на результат измерения относительного зазора h^* заключается в том, что изменение толщины покрытия T_n в некотором малом диапазоне не влияет на сигнал ВТП, или ее влияние совпадает с влиянием относительного зазора h^* . Рассмотрим представленный на рисунке 5.а годограф зависимости комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от контролируемого (T_n) и мешающего (h^*) параметров, при относительной электропроводности покрытия $\sigma_n/\sigma_0 < 0,4$.

На участке А-В, что соответствует диапазону толщин T_n от 0 до 20 мкм $\Delta\varphi$ не изменяется, образуя тем самым зону нечувствительности, рисунок 6.а. Использование амплитуды $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ в качестве информативного параметра ВТП не представляется возможным, поскольку на нее существенное влияние оказывает h^* . На участке В-С, который соответствует диапазону толщин T_n от 20 до 60 мкм чувствительность фазы $\Delta(\Delta\varphi)/\Delta T_n$ не превышает $0,05^\circ/\text{мкм}$, а на участке С-Д, что соответствует диапазону толщин T_n от 60 до 130 мкм, $\Delta(\Delta\varphi)/\Delta T_n$ составляет порядка $0,05 \dots 0,075^\circ/\text{мкм}$. В общем случае, это позволяет проводить измерения толщины покрытия T_n в диапазоне от 20 до 130 мкм фазовым методом с абсолютной погрешностью на уровне $\pm(1,5 \dots 3)$ мкм без уменьшения влияния h^* на дополнительную погрешность измерения.

Для обеспечения возможности измерения толщины покрытий в диапазоне от 0 до 50 мкм необходимо перенести точку А, соответ-

ствующую $T_n=0$ и $h^*=0$, на участок С-D годографа $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T_n)$. Это может быть достигнуто введением «дистанционной прокладки» определенной толщины $T_{\text{пр}}$ между контактной поверхностью преобразователя и ОК из износостойкого материала, близкого по электропроводности к измеряемому покрытию. Если электропроводность материала прокладки и покрытия отличаются более чем на 10%, то толщина прокладки $T_{\text{пр}i}$ определяется выражением:

$$T_{\text{пр}i} = T_{\text{пр}} \sqrt{\sigma_n / \sigma_{\text{пр}}} , \quad (2)$$

где $T_{\text{пр}}$ - необходимая толщина прокладки при $\sigma_{\text{пр}}=\sigma_n$;
 $\sigma_{\text{пр}}$ - электропроводность материала прокладки.

В общем случае величина $T_{\text{пр}}$ подбирается для каждой задачи индивидуально исходя из анализов результатов моделирования либо экспериментально. Для рассматриваемой задачи измерения толщины оловянных покрытий изделий из меди оптимальная толщина прокладки $T_{\text{пр}}=30-55$ мкм. В этом случае, при изменении T_n от 0 до $T_{n \text{ max}}-T_{\text{пр}}$ годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T_n)$ будет находиться между точками С и Е. Линия отвода h^* (при $T_n=0$) свяжет точку С с точкой F на годографе $\dot{U}_{\text{вн}}^*(T_{\text{пр}})$ при $h^*=\infty$ (рисунок 5.б). На рисунке 6.б представлены зависимости фазы $\Delta\phi$ относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ при изменении контролируемого (T_n) параметра при $T_{\text{пр}}$ 15, 30 и 55 мкм.

Поскольку изменению T_n и h^* соответствуют различные по фазе годографы $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ на комплексной плоскости, то для уменьшения влияния относительного зазора h^* на дополнительную погрешность измерения T_n градуировочная характеристика преобразователя должна представлять собой семейство зависимостей $\Delta\phi(T_n, h^*)$ и $\Delta U(T_n, h^*)$, изображенных на рисунке 7.

Экспериментальные исследования показали, что при установленной дистанционной прокладке абсолютная дополнительная погрешность измерения толщины покрытия сплавом олово-висмут изделий из меди амплитудно - фазовым преобразователем в следствии изменения h^* в диапазоне от 0 до 0,1 не превышала $\pm 0,8$ мкм.

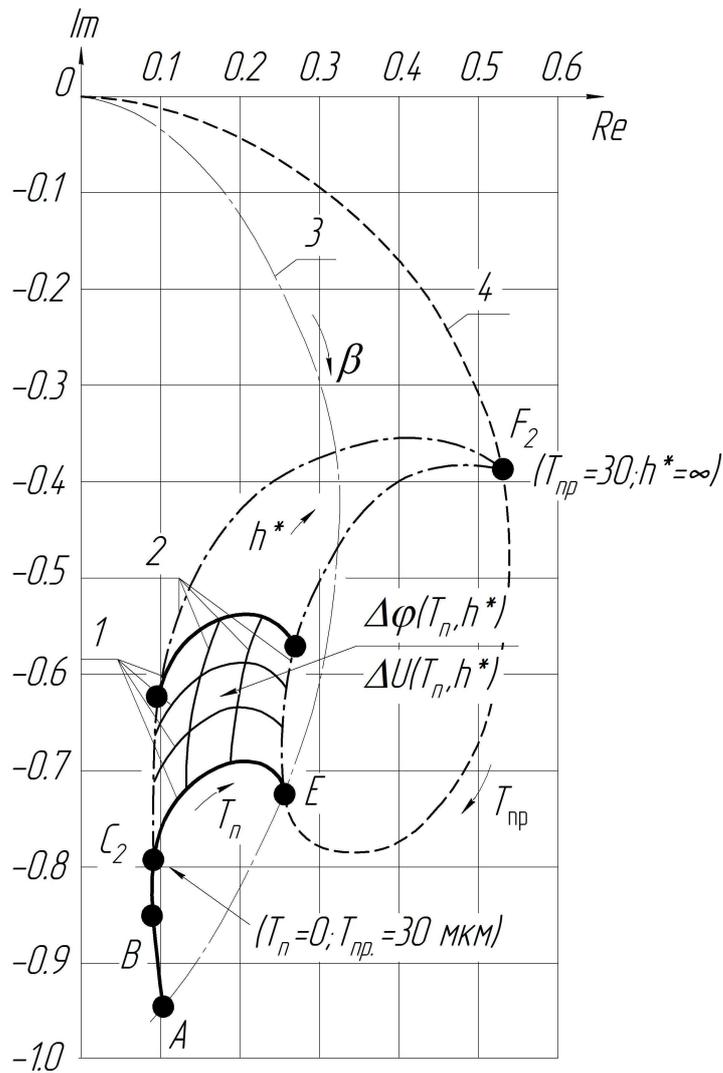


Рисунок 7. Семейство годографов $\bar{U}_{\text{вн}}^*(T_n, h^*)$ с дистанционной прокладкой толщиной $T_{\text{np}}=30$ мкм при различных значениях h^* .
 1 - линии влияния T_n при различном h^* ; 2 - линии влияния h^* при различной T_n ; 3 - линия обобщенного параметра β ; 4 - линия влияния T_{np} при $h^*=\infty$ (отсутствие ОК вблизи ВТП)

Положение 3.

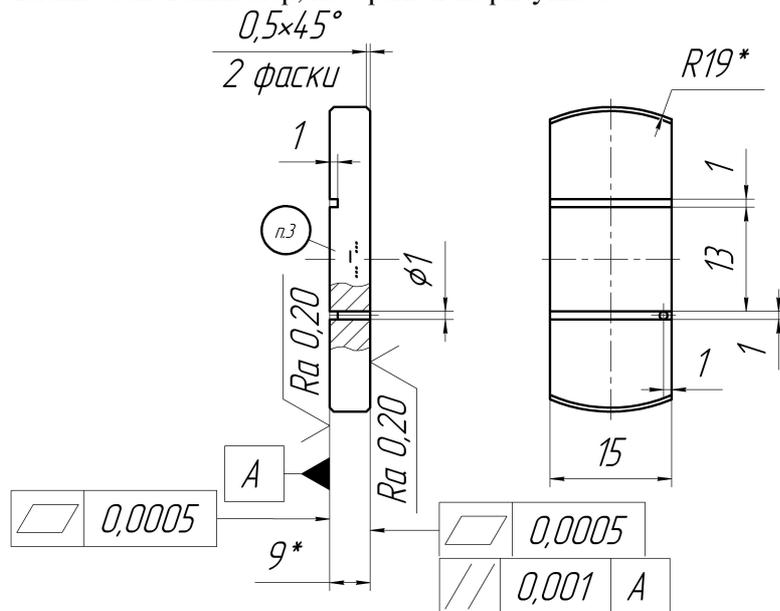
Предлагаемая конструкция и технология изготовления оснований, приемы их отбора и подготовки совместно с технологиями получения покрытий и методикой аттестации их толщины обеспечивают возможность изготовления комплектов мер толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с абсолютной погрешностью не превышающей $\pm 0,3$ мкм, что удовлетворяет условиям градуировки и поверки вихретоковых толщиномеров неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с абсолютной погрешностью измерения не более ± 1 мкм в диапазоне толщин покрытий от 0 до 50 мкм.

В соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерения толщины, утвержденную в качестве рекомендации по метрологии Р50.2.006-2001, основным средством поверки толщиномеров покрытий по ГОСТ 8.502 являются эталонные меры толщины покрытий. Существовавший ранее ГОСТ 25177-82 «Меры толщины покрытий образцовые. Основные параметры и размеры. Общие технические требования» не действителен с 1988 года в связи с истечением срока действия. С развалом СССР выпуск мер толщины практически прекратился, а технологии их изготовления были утрачены. Отсутствие действующей нормативной документации и другие перечисленные обстоятельства ставят под угрозу обеспечение единства измерений толщины покрытий в России.

Мера толщины неферромагнитного электропроводящего покрытия представляет собой физическое тело, воспроизводящее размер толщины покрытия и состоит из покрытия и основания, связанных между собой адгезией либо другим способом соединения. Передавая вихретоковому толщиномеру размер контролируемого параметра (физической величины [мкм]) мера одновременно должна нести информацию о свойствах материала покрытия и основания. В связи с этим, мера так же предназначена для хранения, воспроизведения и передачи параметра удельной электропроводности материала основания и покрытия.

Анализ модели ступенчатой меры толщины покрытия, учитывающий реальные условия, возникающие при формировании и

измерении толщины покрытия, и проведенные экспериментальные исследования позволили выделить основные составляющие погрешности меры толщины покрытия. Так, условием уменьшения погрешности передаваемой мерой величины толщины покрытия будет минимизация отклонения от плоскостности рабочей поверхности основания, шероховатости поверхности основания и покрытия и неравномерности толщины покрытия. Данные условия позволили определить основные требования к конструкции основания меры, а также разработать оптимальный технологический процесс их изготовления. Фрагмент рабочего чертежа, по которому осуществляется изготовление оснований мер, изображен на рисунке 8.



1. *Размер для справок.

2. H12; h12 ± $\frac{IT12}{2}$.

3. Маркировать после контроля электропроводности методом лазерной гравировки.

Рисунок 8. Фрагмент рабочего чертежа на изготовление оснований мер толщины покрытий.

Технологический процесс изготовления мер состоит из следующих основных технологических операций:

1. Изготовление заготовок оснований мер;
2. Прецизионная доводка поверхностей оснований мер;
3. Контроль геометрических параметров оснований (отклонение от плоскостности, контроль шероховатости);
4. Контроль и отбраковка оснований по электропроводности;
5. Нанесение сектора покрытия на основание меры;
6. Выравнивание толщины покрытия меры до соответствия требованию разнотолщинности покрытия методом притирки;
7. Измерение толщины покрытия мер и передача в первичную поверку.

Изготовление заготовок оснований мер осуществляется из одного прутка материала методами механической обработки: точение, фрезерование. Заключительной операцией механообработки является финишное шлифование. Для обеспечения требуемых параметров по плоскостности и качеству подготовки поверхностей мер основания подвергаются операции доводки. Доводка осуществляется на доводочных станках или вручную на доводочных плитах с использованием алмазного абразива различной зернистости.

Контроль отклонения от плоскостности осуществляется интерференционным методом, шероховатости - профилометрическим методом. Минимизация общей площади основания меры позволяет уменьшить вероятность возникновения недопустимых отклонений от плоскостности поверхностей мер в процессе шлифовки и доводки, тем самым снижает процент брака и трудоемкость процесса изготовления. Продольные пазы на основании меры четко ограничивают рабочую область, упрощают процедуру изоляции непокрываемых участков перед нанесением покрытия и исключают наростообразование на границах зоны покрытия. Обязательным этапом в процессе изготовления оснований введен контроль их удельной электропроводности σ_0 . Допустимое отклонение действительной электропроводности основания $\sigma_{од}$ от установленного для каждой марки материала номинального справочного значения $\sigma_{он}$ в общем случае различно для каждого типа покрытия. В виду этого, контроль $\sigma_{од}$, а также ее девиации по поверхности меры целесообразно осуществ-

лать вихретоковым преобразователем, настроенным на измерение толщины покрытий того же типа, что и покрытие которое предполагается наносить на исследуемые основания. Показания вихретокового преобразователя в любой точке не должны отличаться от 0 более чем на $\pm 0,2$ мкм. Контроль электропроводности оснований, использование стандартных электролитов (номер состава и карты по ГОСТ 9.305-84) и нанесение покрытий в одной ванне при заданных нормальных условиях с последовательным извлечением мер через заданные временные интервалы позволяют исключить появление дополнительной погрешности, связанной с отклонением электропроводности покрытия и основания в процессе градуировки и поверки вихретоковых преобразователей.

Экспериментальные исследования показали, что предлагаемые технологии и методики, позволяют изготавливать комплекты мер толщины ферромагнитных электропроводящих покрытий на ферромагнитных электропроводящих основаниях с абсолютной погрешностью аттестации толщины покрытия не более $\pm 0,3$ мкм в диапазоне от 0 до 50 мкм, что удовлетворяет условиям градуировки и поверки вихретоковых толщиномеров с абсолютной погрешностью измерения не более ± 1 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основе анализа литературных источников и выполненных теоретических и экспериментальных исследований была решена актуальная научно-практическая задача – уменьшение погрешности средств измерения толщины ферромагнитных электропроводящих покрытий на ферромагнитных электропроводящих основаниях, основанных на методах вихретокового вида неразрушающего контроля. На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты работы:

1. Для неразрушающего измерения толщины ферромагнитных электропроводящих покрытий на ферромагнитных электропроводящих основаниях в диапазоне от 0 до 50 мкм с абсолютной погрешностью измерения не более ± 1 мкм рекомендован вихретоковый вид контроля с применением сбалансированных трехобмоточных накладных ВТП с ферритовым сердечником.

2. Разработан и реализован способ выделения информативного параметра сигнала ВТП, позволяющий уменьшить погрешность измерения толщины покрытия T_n при изменении зазора h .

3. Разработана конструкция, технология изготовления и методика аттестации натуральных мер толщины покрытий, обладающих заданными метрологическими характеристиками, которые удовлетворяют условиям поверки вихретоковых толщиномеров неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях с абсолютной погрешностью измерения не более ± 1 мкм в диапазоне толщин покрытий от 0 до 50 мкм.

4. Определена оптимальная частота тока возбуждения преобразователя, зависящая от максимальной толщины и электропроводности измеряемого покрытия.

5. Показана возможность измерения толщины неферромагнитного электропроводящего покрытия на неферромагнитном электропроводящем основании с относительной электропроводностью $\sigma_n/\sigma_o < 0,4$ и $\sigma_n/\sigma_o > 2$ с отстройкой от влияния зазора h на результат измерения.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Измерение толщины покрытий из оловянных сплавов на изделиях из цветных металлов с использованием вихретокового амплитудно - фазового метода // Контроль. Диагностика №5, 2011. -С. 12-16.

2. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Обеспечение достоверности результатов измерений толщины металлических покрытий магнитными и вихретоковыми методами в условиях машиностроительных производств // Метрология №2, 2011. -С. 3-12.

3. Сясько В.А., Чертов Д.Н., Ивкин А.Е. Измерение толщины стенок изделий из углеродных композиционных материалов с использованием вихретокового фазового метода // Дефектоскопия №8, 2011. - С. 76-84.

4. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Вихретоковая толщинометрия неферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов // Мир измерений №6, 2010. -С. 18-23.

5. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Методы и средства измерения толщины металлических покрытий // Мир гальваники №1, 2011. -С. 54-57.
6. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Измерение толщины покрытий из драгоценных металлов с использованием вихретокового вида контроля // В мире неразрушающего контроля №2, 2012. -С. 22-25.
7. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Метрологическое обеспечение вихретоковых толщиномеров гальванических покрытий // Мир гальваники №3, 2012. -С. 52-54.

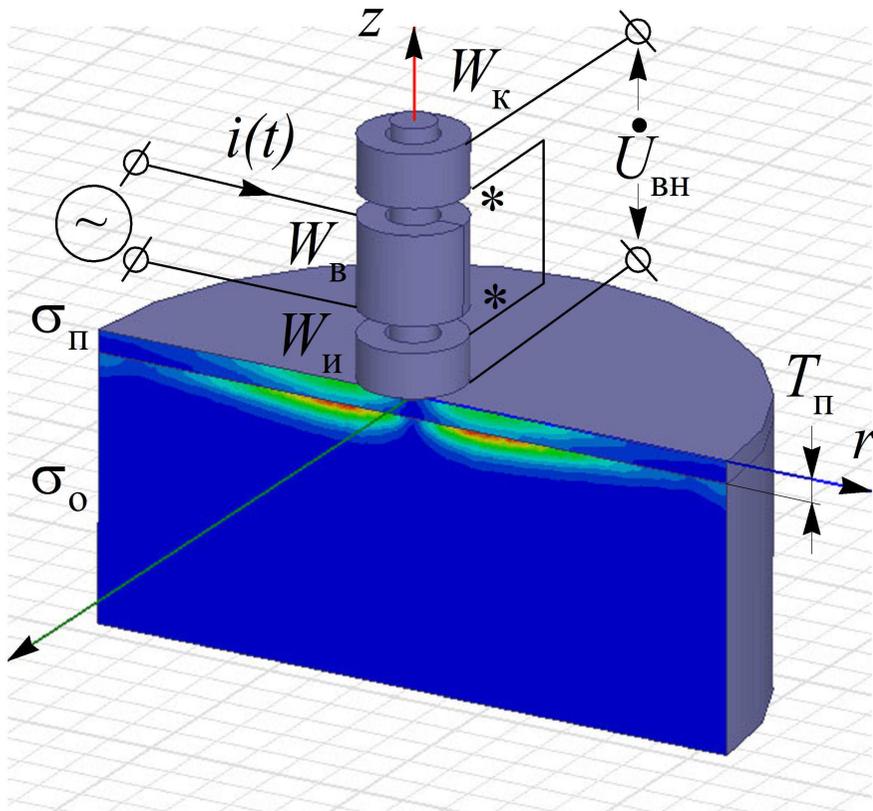


Рисунок 1. Модель первичного трехобмоточного накладного измерительного вихретокового преобразователя.

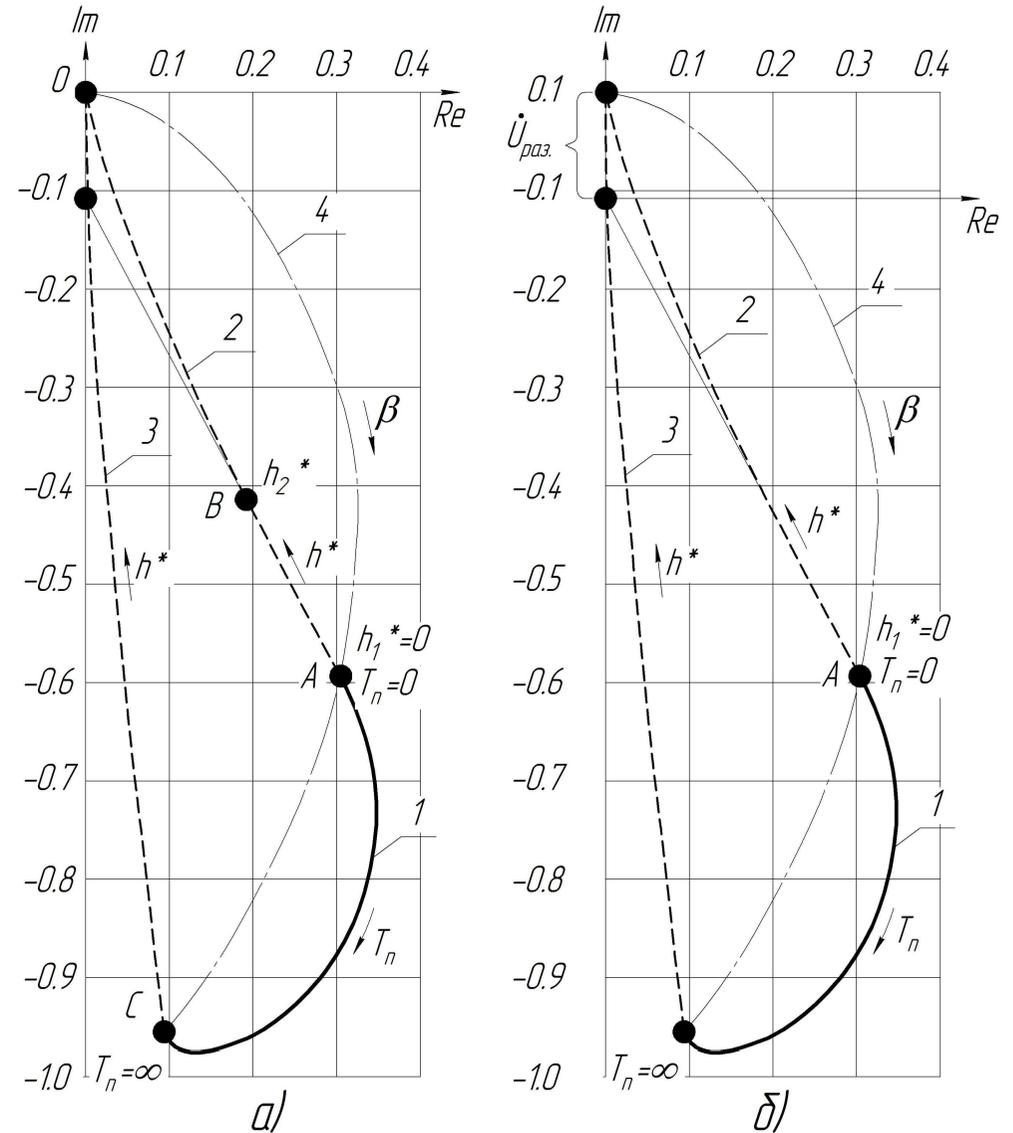


Рисунок 2. Годограф зависимости комплексного относительного вносимого напряжения \dot{U}_{BH}^* от контролируемого (T_n) и мешающего (h^*) параметров: а) - исходный годограф вектора \dot{U}_{BH}^* ; б) - годограф вектора \dot{U}_{BH}^* со смещением точки начала координат на величину $\dot{U}_{раз}^*$.
1 - линия влияния T_n ; 2 - линия влияния h^* при $T_n=0$; 3 - линия влияния h^* при $T_n=\infty$; 4 - линия обобщенного параметра β .

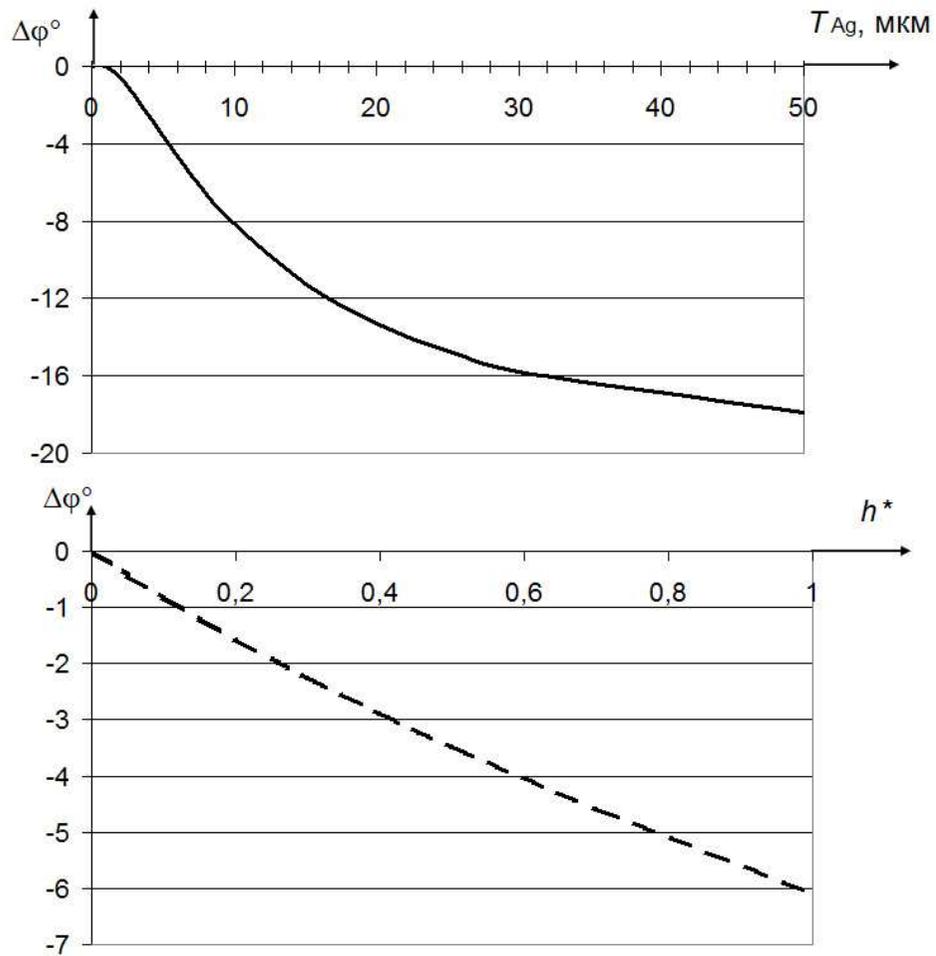


Рисунок 3. Зависимость $\Delta\varphi$ вносимого напряжения $\hat{U}_{вн}^*$ при изменении контролируемого (T_n) и мешающего (h^*) параметров из точки наблюдения, расположенной на пересечении вещественной и мнимой осей годографа

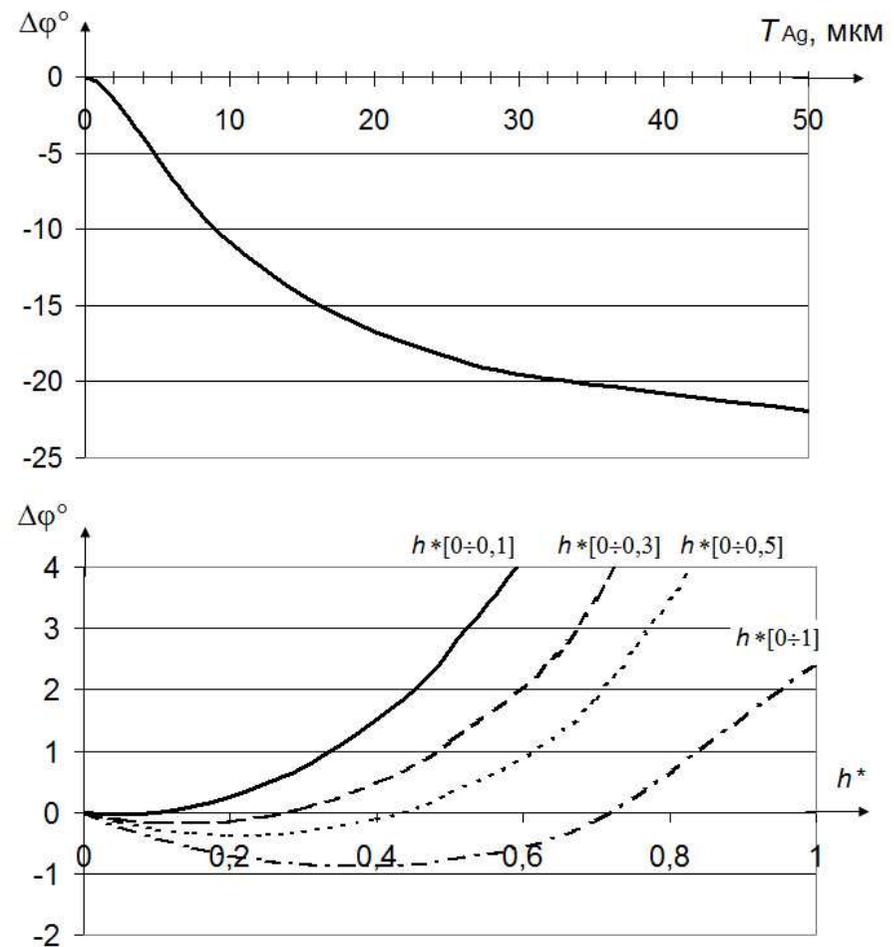


Рисунок 4. Зависимость $\Delta\varphi$ вносимого напряжения $\hat{U}_{вн}^*$ при изменении контролируемого (T_n) и мешающего (h^*) параметров из точки наблюдения, смещенной на величину $\hat{U}_{раз}^*$ для диапазонов допустимого изменения h^* от 0 до 0,1; от 0 до 0,3; от 0 до 0,5; от 0 до 1 мм.

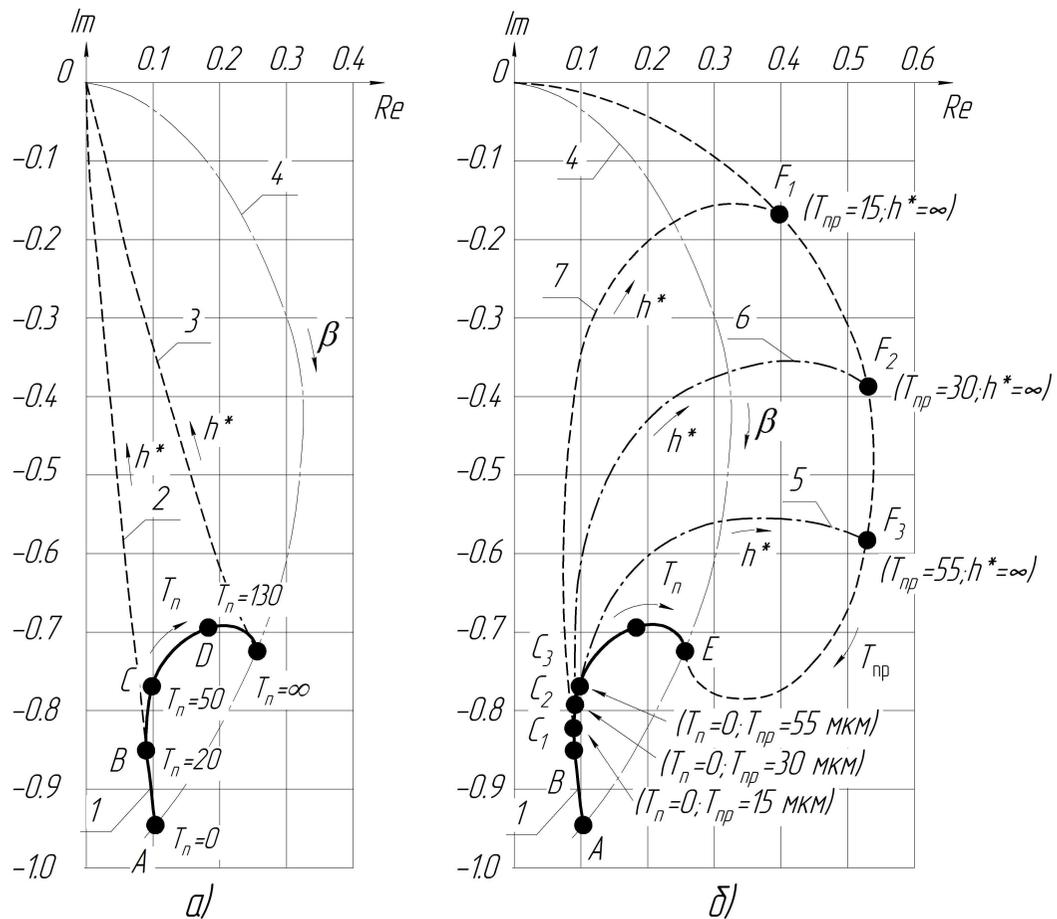


Рисунок 5. Годограф зависимости комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ от контролируемого (T_n) и мешающего (h^*) параметров: а) - исходный годограф вектора $\dot{U}_{вн}^*$; б) - годограф вектора $\dot{U}_{вн}^*$ с установленными прокладками.

1 - линия влияния T_n ; 2 - линия влияния h^* при $T_n=0$; 3 - линия влияния h^* при $T_n=\infty$; 4 - линия обобщенного параметра β ; 5 - линия влияния h^* при $T_n=0$ и $T_{пр}=55$ мкм; 6 - линия влияния h^* при $T_n=0$ и $T_{пр}=30$ мкм; 7 - линия влияния h^* при $T_n=0$ и $T_{пр}=15$ мкм; 8 - линия влияния $T_{пр}$ при $h^*=\infty$ (отсутствие ОК вблизи ВТП)

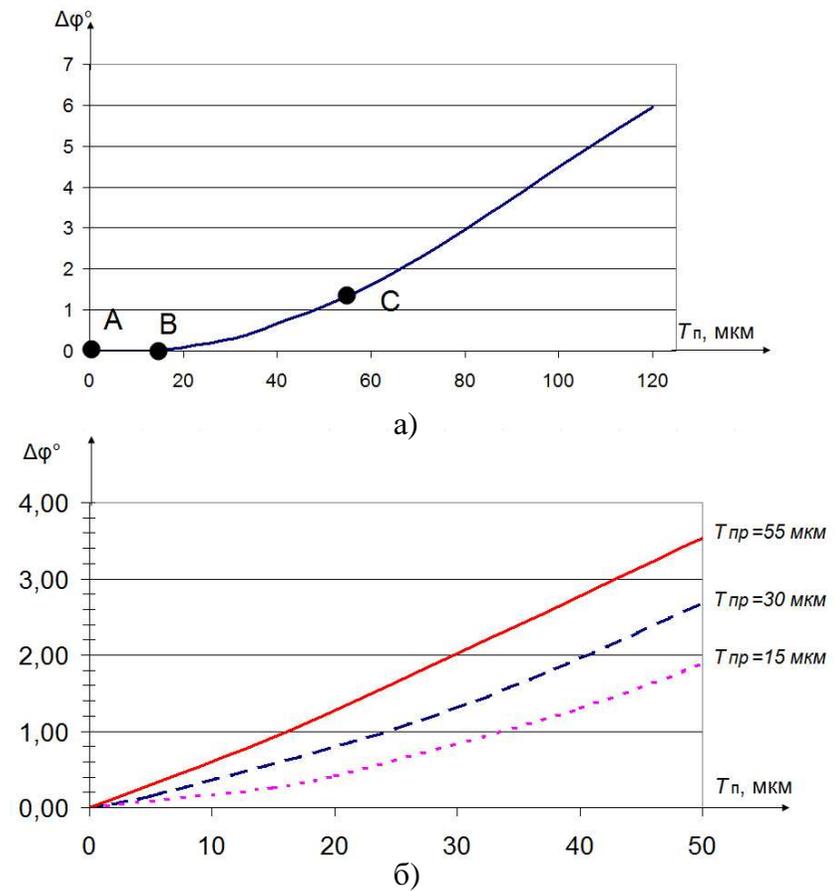


Рисунок 6. Зависимость фазы $\Delta\varphi$ относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ при изменении контролируемого (T_n) параметра:

а) без установки дистанционной прокладки (участок А-В - зона нечувствительности); б) с установкой дистанционной прокладки разной толщины.